

---

*Телекомунікація, радіолокація, навігація*

---

**МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ ВИХРОСТРУМОВОГО  
АНАЛІЗАТОРА МЕТАЛІВ**

*Абрамович А. О., Піддубний В. О., к. т. н., доц.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна*

Ідентифікації металевих об'єктів та визначення їх хімічного складу без фізичного пошкодження самого об'єкту є актуальною задачею. Вона може бути вирішена різними методами [1], наприклад опто-емісійними, рентгено-флуорисцентними, хімічними. Одним з перспективних напрямків є використання вихрострумів методів ідентифікації дозволяють створити радіотехнічну систему (РС), що має можливість ідентифікувати метал, з якого виготовлений об'єкт контролю (ОК) [2], наприклад відрізнити мідь від срібла або сталь від нікелю. Нами розроблений лабораторний макет такого пристрою. В вхідному каскаді використовується фазовий детектор, за формою вихідного сигналу якого можна ідентифікувати склад ОК.

Процесам формування сигналу вихрострумів пристрою (ВСП), присвячено ряд робіт. Було запропоновано ряд моделей, які пояснюють виникнення сигналу ВСП. Це модель Клаудіо Брушіні, яка описана в його докторській дисертації [3] та модель, що розглядається в теорії неруйнівного контролю [4]. Однак ні одна із них в повній мірі не пояснюють причини виникнення та форму сигналу на виході фазового детектора (ФД). В даній роботі розглянуті особливості виникнення сигналу та пропонується модель, яка дозволяє описати сигнали на виході ФД.

Розглянемо процеси, що відбуваються при скануванні ОК антенною системою РС, та перетворення, які відбуваються в вхідних каскадах вихрострумів аналізатору металів. При відсутності ОК в зоні дії антенної системи на приймальну антену від передавальної наводиться лише сигнал частотою  $\omega$ . Амплітуда наведеного сигналу постійна і залежить лише від взаємної індуктивності між антенами. Миттєве значення напруги у приймальній антені  $U_e = U_{e0} \cdot \cos(\omega \cdot t)$ , де  $U_{e0}$  — амплітуда сигналу, що наводиться в антені при відсутності ОК в зоні дії антенної системи.

Якщо металевий ОК рухається паралельно антенній системі та перетинає її вздовж осі, що проходить через центр системи, то сигнал на виході приймальної антени змінює відносно сигналу випромінюваного передавальною антеною фазу та амплітуду, тобто відбувається амплітудна та фазова модуляції сигналу. Будемо вважати, що в першому наближенні закон зміни фази та амплітуди лінійний і є функцією часу. Інформативною ознакою є зміна фази. Зміна амплітуди сигналу внаслідок руху ОК — це процес додаткової амплітудної модуляції сигналу, що визначається лінійною швидкістю переміщення ОК між витками приймальної та передавальної антен.

Миттєве значення сигналу в приймальній антені може бути записано як:

$$U_e = U_{e0} \cdot \cos\left(\frac{V}{L} \cdot t\right) \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi(t)),$$

де  $\varphi(t) = \varphi_{\text{поч}} + \Delta\varphi \cdot t$ ,  $\varphi_{\text{поч}}$  — початкове значення зсуву фази,  $\Delta\varphi$  — крок зміни початкової фази,  $V$  — лінійна швидкість руху ОК вздовж витків антени,  $L$  — відстань між приймальною та передавальною антенами. Значення  $\varphi(t)$  змінюється у діапазоні від  $\varphi_{\text{поч}}$  до  $\varphi_{\text{max}}$ , де  $\varphi_{\text{max}}$  — максимальне значення зсуву початкової фази.

Сигнал  $U_e$  подається на один із входів синхронного фазового детектора [5]. Першим етапом при моделюванні було визначення початкового зсуву фази  $\varphi_{\text{поч}}$  та його максимального значення  $\varphi_{\text{max}}$ . Вони були експериментально виміряні для деяких матеріалів за допомогою лабораторного макету РС. Значення зсуву фази в сигналі на вході синхронного детектора відносно опорного сигналу, яким є сигнал в передавальній антені складають: для міді —  $0^\circ \dots -120^\circ$ , для титану —  $0^\circ \dots 72^\circ$ . Далі за допомогою пакету прикладних програм Матлаб був змодельований сигнал на виході фазового детектора. На рис.1 представлені теоретично розраховані (штрихова лінія) та експериментально отримані (суцільна лінія) сигнали для ОК виготовлених із цих матеріалів.

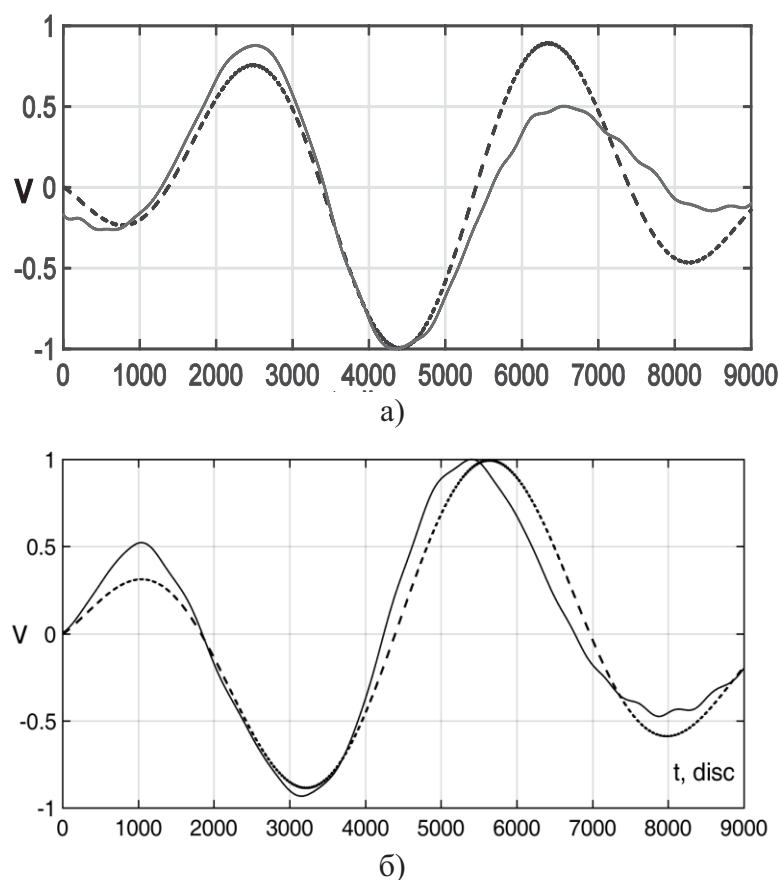


Рисунок 1. Сигнали на виході ФД, отримані теоретично (штрихова лінія) та експериментально (суцільна лінія) для ОК із а) міді та б) титану.

Подальша обробка сигналу проводилася методами запропонованими в [2], що дозволяють ідентифікувати метал, з якого виготовлено об'єкт контролю.

Таким чином, запропонована математична модель дозволяє отримати сигнали на виході фазового детектора вихрострумової радіотехнічної системи близькі за формою до експериментально знятих для зразків, виготовлених з тих же матеріалів, що розглядалися при моделюванні.

### **Перелік посилань**

1. Промышленная группа Лаборант. Анализаторы металлов и руд [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. — Электронні дані. — Режим доступу: <http://www.laborant.net/catalog> (дата звернення 21.04.2017) — Назва з екрана.
2. Абрамович А. О. Дистанційний вихрострумовий аналіз складу металевих об'єктів / А. О. Абрамович, В. О. Піддубний, І. С. Каширський // Міжнародний науково-технічний журнал «Металлофизика и новейшие технологии». Київ — 2017. Том.39 Вип. №8. — С. 1035-1049. (Scopus) URL: <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v39/i08/1035.html>
3. Claudio Bruschini A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining: Doctor in Applied Sciences Thesis: Claudio Bruschini. — Brussels, 2002 p. — 242p.
4. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. Гринев А. Ю. М.: Радиотехника, 2005.— 416 с.
5. У. Титце Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство / Титце У., Шенк К. — М.: Мир, 1982 — 512с.

### **Анотація**

Наводяться результати моделювання сигналу на виході фазового детектора вихрострумового пристрою для ідентифікації металів. Порівнюються результати моделювання сигналу з експериментально отриманими сигналами.

**Ключові слова:** вихрострумовий перетворювач, радіотехнічні системи виявлення та вимірювання, математичне моделювання.

### **Аннотация**

Приводятся результаты моделирования сигнала на выходе фазового детектора вихретокового устройства идентификации металлов. Сравниваются результаты моделирования сигнала с экспериментально полученными сигналами.

**Ключевые слова:** вихретоковый преобразователь, радиотехнические системы обнаружения и измерения, математическое моделирование.

### **Abstract**

The results of the modeling of the signal at the output of the phase detector eddy current device for identification of metals are presented. The results of signal simulation are compared with the experimentally obtained signals.

**Keywords:** eddy current converter, radio engineering detection and measurement systems, mathematical modeling.